

文章编号: 1000-3851(2010)03-0105-06

基于多重信号分类算法的复合材料冲击定位

苏永振, 袁慎芳*, 王 瑜

(南京航空航天大学 智能材料与结构航空科技重点实验室, 南京 210016)

摘要: 为了提高复合材料结构冲击定位的精度和实时性, 将阵列信号处理技术引入到结构健康监测领域, 提出了利用小波变换和多重信号分类算法实现复合材料结构冲击定位的新方法: 通过小波变换提取冲击响应信号某一窄带频率成分, 运用多重信号分类(MUSIC)算法实现冲击源到达方向的估计; 根据 Lamb 波传播特性, 用小波变换求出某一中心频率下的对称模式和反对称模式的 Lamb 波到达同一传感器的时间差, 结合对称模式和反对称模式 Lamb 的速度差就可以估计出冲击源到达传感器的距离, 实现冲击定位。对玻璃纤维/环氧树脂复合材料层合板和碳纤维/双马树脂基复合材料层合板 2 种试件的实验均表明该方法能快速、精确地识别出冲击源位置。

关键词: 复合材料; 冲击定位; 阵列信号处理; 多重信号分类; 小波变换

中图分类号: TB332; TG115.28 **文献标志码:** A

Impact localization in composite using multiple signal classification method

SU Yongzhen, YUAN Shenfang*, Wang Yu

(The Aeronautic Key Laboratory for Smart Material and Structures and Astronautics,
Nanjing University of Aeronautic, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to improve accuracy and real-time of impact localization in composite, the array signal processing technique was introduced into the area of structure health monitoring and a new method for impact monitoring in composite was proposed based on the wavelet transform and multiple signal classification(MUSIC) method. Firstly, narrowband frequency components of response signals were extracted by using wavelet transform, followed by the estimation of the direction-of-arrival (DOA) based on MUSIC method. Secondly, based on the propagation characteristics of lamb wave, the time-delay between symmetry and antisymmetry modal waves of one central frequency lamb wave arriving to the same array element was gained by using the wavelet transform, and the distance between impact source and array element was estimated according to velocity difference between symmetry and antisymmetry modal waves, thus the impact localization was realized. Experiments on the laminated glass fiber reinforced epoxy composite and laminated carbon fiber reinforced bismaleimide composite indicate that the present methodology can identify the impact location fast and accurately.

Keywords: composite; impact localization; array signal processing; multiple signal classification; wavelet transform

复合材料层合结构具有比强度高、比刚度大及材料性能可设计等一系列优点, 在航空、航天等工程领域得到了日益广泛的应用。其不足之处在于抗冲击能力差, 易造成内部分层和基体开裂等, 使结构承载能力大大降低, 结构强度及稳定性严重退化^[1]。因此, 很有必要利用结构健康监测技术^[2]对冲击事件进行实时监测。

目前识别冲击位置的方法很多, 主要有两大类: (1)声发射分析方法, 主要是通过求解由冲击

产生的声发射信号到达不同传感器的时延, 结合传播速度进行定位^[3-6]。此类方法对各向同性材料有较高的定位精度, 但在复合材料中由于复合材料结构的各向异性、应力波的反射和散射及噪声的影响, 很难准确确定波速及波达时间, 从而不能实现精确冲击定位。(2)逆问题分析方法, 主要通过建立优化模型, 把冲击位置识别问题转化为优化求逆问题^[7-10], 从数学本质上讲是一个反问题求解过程, 反问题的不定特性及冲击位置与响应信号的

收稿日期: 2009-06-22; 收修改稿日期: 2009-09-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50830201); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA03Z117)

通讯作者: 袁慎芳, 教授, 研究方向: 智能材料与结构、结构健康监测 E-mail: ysf@nuaa.edu.cn

高阶非线性关系给求解带来很大困难,加之未知量数目巨大和计算任务繁重,定位的实时性很难得到保证。本文中利用阵列信号处理技术解决复合材料结构冲击定位的准确性和实时性问题。阵列信号处理技术在雷达、声纳、无线通信、医学成像、地质勘探等多个领域已获得了广泛的应用。Schmidt^[11]等人在 1979 年提出了多重信号分类(MUSIC)算法,促进了特征结构分类算法的兴起和发展,该算法已成为空间谱估计理论体系中的标志性算法。MUSIC 算法的基本思想是将任意阵列输出数据的协方差矩阵进行特征分解,从而得到与信号分量相对应的信号子空间和与信号分量相正交的噪声子空间,然后利用这两个子空间的正交性来估计信号参数(入射方向、极化信息及信号强度等)。

本文中针对复合材料结构,提出了利用小波变换^[12-13]和 MUSIC 算法实现冲击定位的新方法。该方法分为两步:(1)基于小波变换和 MUSIC 算法实现冲击源到达方向(DOA)的估计;(2)根据小波变换和 Lamb 传播特性估计出冲击源到达传感器阵元的距离,从而实现冲击定位。

1 方法原理

1.1 经典 MUSIC 算法

窄带远场信号的 DOA 数学模型为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$ 为 K 维源信号向量, $\mathbf{A}(\theta) = [a_1(\theta_1), a_2(\theta_2), \dots, a_K(\theta_{2K})]$ 为 $M \times K$ 维方向矩阵, $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$ 为 M 维观测信号向量, $\mathbf{N}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$ 为 M 维阵列白噪声向量, θ 为信号源来向与阵列法线的夹角, K 为信号源个数, M 为阵元个数。对阵元间距为 d 的均匀线阵,阵列的方向向量为

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{-j\pi fd/c \sin\theta}, \dots, e^{-j2\pi fd/c(M-1)\sin\theta}]^T$$

阵列数据的协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (2)$$

由于信号与噪声相互独立,数据协方差矩阵可分解为与信号、噪声相关的两部分,其中 \mathbf{R}_s 是信号的协方差矩阵, $\mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H$ 是信号部分。对 \mathbf{R} 进行特征值分解,可以分为两部分

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_s\mathbf{\Sigma}_s\mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_N\mathbf{\Sigma}_N\mathbf{U}_N^H \quad (3)$$

式中: $\mathbf{\Sigma}_s$ 为 K 个大特征值组成的对角阵, $\mathbf{\Sigma}_N$ 为 $M-K$ 个小特征值组成的对角阵。 \mathbf{U}_s 为 K 个大特征值对应的特征矢量张成的信号子空间, \mathbf{U}_N 为剩

下 $M-K$ 个小特征值对应的特征矢量张成的噪声子空间。

理想条件下数据空间中的信号子空间与噪声子空间是相互正交的,即信号子空间中的方向矢量也与噪声子空间正交:

$$\mathbf{U}_N^H \mathbf{a}(\theta) = 0 \quad (4)$$

经典 MUSIC 算法正是基于上述这个性质提出,但考虑到实际接收数据矩阵的有限长度,常采用协方差矩阵的样本估计值 $\hat{\mathbf{R}}$,对 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行特征分解可以计算得到噪声子空间特征矢量矩阵 $\hat{\mathbf{U}}_N$ 。在实际情况下噪声与信号并非完全不相关,因此,噪声空间与信号空间不完全正交,即 $\mathbf{a}(\theta)$ 并不能与 $\hat{\mathbf{U}}_N$ 完全正交,也就是说式(4)并不成立。因此实际上求信号源的波达方向是以最小优化搜索实现的,即

$$\theta_{\text{MUSIC}} = \arg \min_{\theta} \mathbf{a}^H(\theta)\hat{\mathbf{U}}_N\hat{\mathbf{U}}_N^H \mathbf{a}(\theta) \quad (5)$$

因此, MUSIC 算法的谱估计公式为

$$P_{\text{MUSIC}} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\hat{\mathbf{U}}_N\hat{\mathbf{U}}_N^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (6)$$

与“谱峰”对应的 θ 即为信源 DOA 的估计值。

MUSIC 算法本质上是对数据方差矩阵进行特征值分解,把较大特征值对应的特征矢量作为信号子空间,把其余较小特征值对应的特征矢量作为与信号子空间正交的噪声子空间。在单个信号源的情况下,只取最大的一个特征值对应的特征向量作为信号子空间,所以该方法本身就具有较强的抗噪能力。但当信噪比小到一定程度时,尤其在多个信号源的情况下,大特征值与小的特征值差别不是太大,该方法性能变得较差,甚至不能正确识别信号源。对于均匀线阵,在只有一个信号源的情况下,根据文献[14]中的关系式:

$$\sigma_s^2 > \frac{1 + M \cdot R}{N} \cong \frac{M \cdot R}{N} \quad (7)$$

式中: σ_s^2 为信号功率, R 为信噪比。当式(7)成立时,噪声引起的误差超过有限观测数据引起的误差,实验时可以选取适当的 N ,尽可能的减小由有限观测数据引起的误差。从上面的不等式中可以看出增加阵元个数可以极大地减小由噪声引起的误差,增强抗噪能力。

1.2 板中 Lamb 波传播特性分析

Lamb 波是在具有两个平行表面的结构中由横波和纵波相互耦合而成的一种弹性波^[15]。根据薄板两表面质点的振动相位关系,可以把 Lamb 波的

模式分为对称波和反对称波 2 种, 同一模式下都含有多阶模态, 对称模式用 $S_k (k=0, 1, 2, \dots)$ 表示, 反对称模式用 $A_k (k=0, 1, 2, \dots)$ 表示。2 种模式可互相独立地在板中传播。不同模态的 Lamb 波具有不同的传播速度, 其大小依赖于频率和板的材料参数, 即 Lamb 波存在频散特性^[16-17]。对于薄板结构^[18-19], 在较低的频率-厚度积下, 主要存在的模态是对称模式的第一阶模态 S_0 和反对称模式的第一阶模态 A_0 , 而且同一频率下的 S_0 传播速度比 A_0 的传播速度快。薄板结构因受到冲击而产生的 Lamb 波响应信号极为复杂, 频率成分非常丰富。本文中利用小波变换提取出所需的 Lamb 波, 根据 Lamb 波频散特性, 利用同一中心频率下的 S_0 模式和 A_0 模式的 Lamb 波的速度差求出冲击源到达同一传感器的时间差。

1.3 冲击定位原理

冲击响应信号的频谱极为复杂, 为宽带信号。在第一步估计冲击源的 DOA 时, 首先利用小波变换提取出某一中心频率下的响应信号, 此信号为窄带信号, 取此窄带信号某一段时间内的信号运用 MUSIC 算法实现 DOA 估计。估计出 DOA 之后, 进行冲击源的距离估计。首先用小波变换提取出第 m 个阵元的某一中心频率下的响应信号, 然后根据 Lamb 波的频散特性可以截取得到对称模式和反对称模式的 2 个波包, 用最大峰值法求出这 2 个波包到达传此阵元的时间差 $\Delta t_m (m=0, \dots, M-1)$, 最后由 2 种模式的传播速度 V_A 和 V_S 就可以求出冲击源到达此阵元的距离 d_m , 即

$$d_m = \Delta t_m V_S V_A / (V_S - V_A) \quad (m = 0, \dots, M-1) \quad (8)$$

为了提高距离估计的精度, 将各阵元估计出的距离值 d_m 转化为相对于阵列参考点的距离 r_m , 取 $r_m (m=0, \dots, M-1)$ 的算术平均最为距离估计值, 即

$$r = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M d_m \quad (9)$$

2 实验验证

2.1 实验装置及试件

实验系统由两块 PCI-6115 数采卡, YE5850 电荷放大器、两块粘贴压电片的复合材料试件及冲击装置组成。采样频率为 2 MHz, 采集点数为 20000 个。软件由 VC 和 Matlab 联合编写, VC 编写数据采集、存储和实时显示程序, Matlab 编写相

应的数据处理算法。

本文中分别在玻璃纤维/环氧树脂复合材料层合板和碳纤维/双马树脂复合材料层合板两块试件上进行了验证实验。2 个实验中采用相同的由 7 个压电片阵元组成的线阵, 每个压电片的直径均为 0.8 mm, 厚度为 0.48 mm, 相邻 2 个压电片中心间的距离为 10 mm。2 个线阵阵元的标号均是从左到右依次为 0~6, 均以 0 号压电片的中心为坐标原点, 以压电阵列的轴线为实轴建立极坐标系。

试件 1 为玻璃纤维/环氧树脂复合材料层合板, 型号为 WS-3240, 其形状和尺寸如图 1 所示, 其基本尺寸为 810 mm×810 mm×2 mm, 有效尺寸为 750 mm×750 mm×2 mm。玻璃纤维/环氧树脂复合材料层合板铺层顺序为 $[0_2/90_4/0_2]_{2S}$, 各层的厚度为 0.125 mm。通过四周螺钉固定在冲击装置上。冲击锤头顶部为半球形, 直径为 10 mm, 固定在摆动装置上。

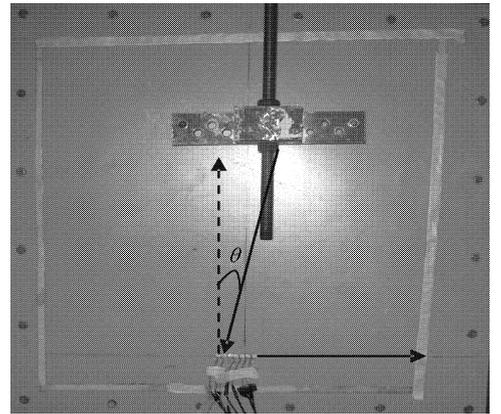


图 1 试件 1 形状及阵元布置图

Fig. 1 Shape of specimen 1 and array element positions

试件 2 为碳纤维/双马树脂复合材料层合板, 其形状及尺寸如图 2 所示, 其基本尺寸为 605 mm×605 mm×2.25 mm, 有效尺寸为 550 mm×550 mm×2.25 mm, 四周通过夹具进行了固定。铺层顺序为 $[45/0/-45/90/0/45/0/-45/0]_{2S}$, 每层厚度为 0.125 mm。冲击工具为弹簧机械冲击杆, 冲击头顶部为半球形, 直径为 8 mm。

实验时两块 4 通道 PCI-6115 数采卡的 0 采集通道都接在 0 号压电片上, 这样可以保证两块数采卡同时触发。实验时通过滤波采集到的是带宽信号, 频带范围为 10~100 kHz, 这样可以有效滤除工频和一些低频振动噪声等信号。由于实验中的玻璃纤维/环氧树脂复合材料层合板为准各向同性,

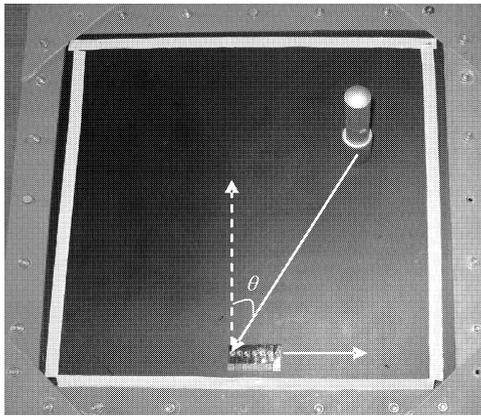


图2 试件2形状及阵元布置图

Fig. 2 Shape of specimen 2 and array element positions

而碳纤维/双马树脂复合材料层合板为各向异性,各方向的波速不同。但在监测区域内速度差别不是太大,所以在进行 DOA 估计时波速取为 0° 、 45° 、 90° 及 -45° 方向上测量值的均值;在进行距离估计时,波速差取为各阵元接收到的同一中心频率的对称模式 Lamb 波和反对称模式 Lamb 波的速度差的均值。

2.2 冲击源定位

冲击作用在试件 1 的 (12.5° , 381.1 mm) 位置时,采集到的传感信号波形如图 3 所示,图 3 中从上到下依次为 0~6 号压电片的波形。进行频谱分析,用具有较强的去噪能力的小波变换提取中心频率为 50 kHz 的信号,可以有效减小噪声干扰。然后截取信号中幅值较大的第 700~1100 个点运用 MUSIC 进行 DOA 估计,图 4 为截得的信号。对截取得到的信号运用 MUSIC 算法进行 DOA 估计可以得到方位谱如图 5 所示,最大谱峰位置对应的角

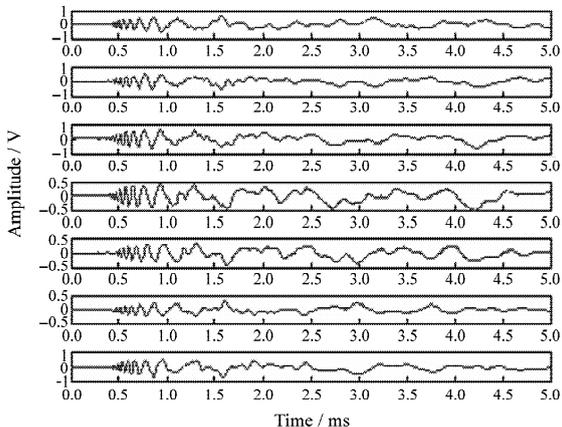


图3 阵元信号波形

Fig. 3 Array element signal waves

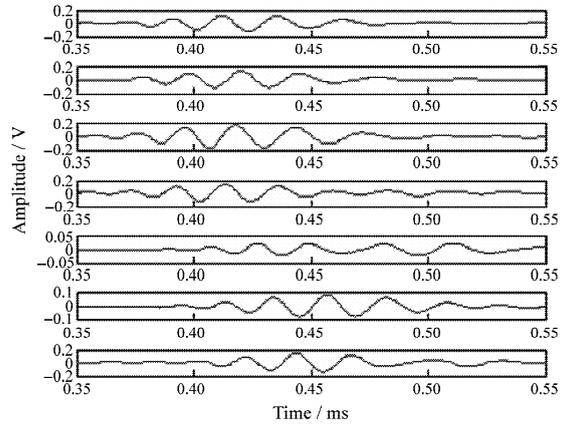


图4 截取的小波波形

Fig. 4 Truncated wavelet waves

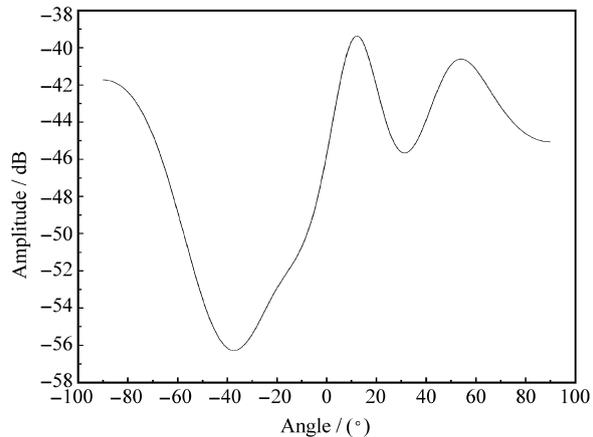


图5 冲击位置1的方位谱

Fig. 5 Direction spectrum of impact position 1

度为 12.6° 。然后按照前文所述的估计冲击源距离的方法进行距离估计。本文中以对 0 号压电片接收到的信号分析为例,首先用小波变换提取出中心频率为 20 kHz 的响应信号如图 6 所示。从图 6 可以看出提取出的中心频率为 20 kHz 的响应有 3 个幅值较大的波包,由于对称模式的 Lamb 波速度较快,先到达传感器,因此,第 1 个波包为对称 S_0 模式波包,第 2 个波包为反对称 A_0 模式波包,第 3 个较大的波包为由反射造成的两种模式的混叠,求出 S_0 模式和 A_0 模式 2 个波包到达 0 号压电片的时间差,根据测得的 2 种模式的速度差,即可估计出冲击源到 0 号压电片的距离 d_0 为 376.4 mm。按照相同的方法可估计出冲击源到达其它压电片的距离。然后运用公式(9)计算出的距离 r 为 381.2 mm,即为冲击源到达坐标原点的距离,从而实现了冲击定位。

当冲击作用在试件 1 的 (29° , 476 mm) 位置时,

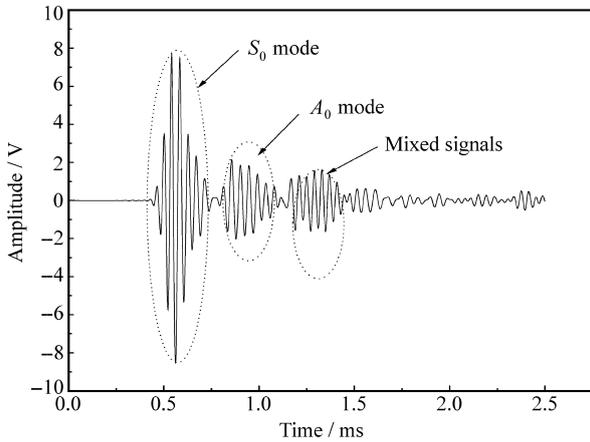


图 6 0号压电片小波变换后的波形

Fig. 6 Wavelet waves of number 0 PZT sensor

按照与前面相同的方法进行定位计算, 估计出的方位谱如图 7 所示, 最大波峰位置对应的 DOA 为 28.7° 。距离估计值为 466.6 mm 。试件 1 上冲击位置 1 的角度估计误差为 0.1° , 距离误差为 0.1 mm ; 冲击位置 2 的角度估计误差为 0.3° , 距离估计误差为 9.4 mm 。

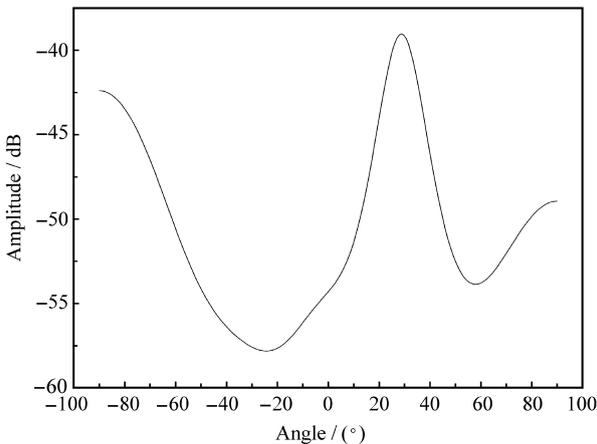


图 7 冲击位置 2 的方位谱

Fig. 7 Direction spectrum of impact position 2

当用冲击杆冲击试件 2 上的 $(41.6^\circ, 366.2\text{ mm})$ 、 $(26.2^\circ, 395.8\text{ mm})$ 、 $(2.8^\circ, 425.6\text{ mm})$ 及 $(-40.4^\circ, 266.7\text{ mm})$ 4 个位置时, 按照上面所述的相同步骤估计出的方位谱如图 8 所示, DOA 角度值分别为 40.5° 、 26.1° 、 1.8° 和 -41.2° 。估计出的距离值分别为 356.1 mm 、 389.1 mm 、 420.2 mm 和 249.8 mm 。从几个冲击点的估计结果可以看出, 角度估计误差不超过 1.1° , 距离估计误差不超过 17 mm 。

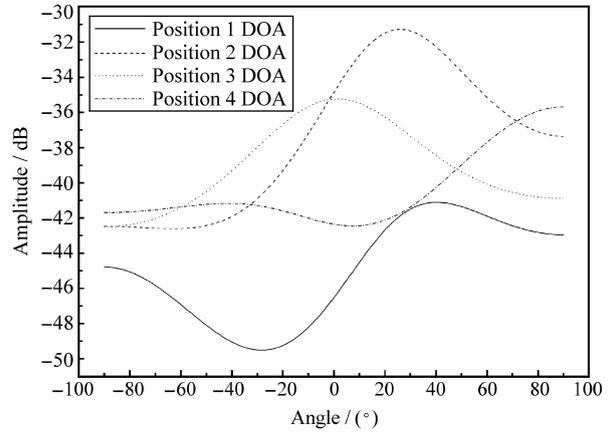


图 8 试件 2 上冲击位置的方位谱

Fig. 8 Direction spectrum of impact position in specimen 2

2 种试件的实验结果均表明本文中所提出的方法能够成功实现冲击定位。实验中的误差是由计算过程中的速度取值造成的, 计算时的速度值采用的是几个方向的均值, 而非各方向实际的速度值。从估计出的角度和距离误差可以看出在玻璃/环氧树脂复合材料层合板上的定位精度比在碳纤维/双马树脂复合材料层合板上的精度高, 这是因为碳纤维/双马树脂复合材料层合板的结构比玻璃/环氧树脂复合材料层合板更加复杂, 碳纤维/双马树脂复合材料层合板上速度取为各方向的均值引起的误差比玻璃纤维/环氧树脂复合材料层合板上的大。本文实验结果也表明在只有一个冲击源的情况下, 选用 7 个阵元的线阵已经能使该方法具有较高的定位精度。

3 结论

(1) 利用阵列信号处理技术中的 MUSIC 算法实现了冲击源的 DOA 的精确估计, 实验中对玻璃纤维/环氧树脂和碳纤维/双马树脂 2 种试件的最大角度估计误差不超过 1.1° 。

(2) 根据 Lamb 波的频散特性, 利用小波变换实现了冲击源距离的估计, 实验中对两种试件的最大距离估计误差不超过 17 mm 。

(3) 本方法可对冲击进行实时、在线监测, 无需额外的传感器和设备。

参考文献:

[1] 王 强, 袁慎芳. 复合材料板脱层损伤的时间反转成像监测 [J]. 复合材料学报, 2009, 26(3): 99-104.
Wang Qiang, Yuan Shenfang. Time reversal imaging method

- for composite delamination monitoring [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(3): 99-104.
- [2] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-18.
- [3] Ziola S M, Gorman M R. Source location in thin plates using cross-correlation [J]. *J Acoust Soc Am*, 1991, 90(5): 2551-2556.
- [4] Tadej Kosel, Igor Grabec. Location of acoustic emission sources generated by air flow [J]. *Ultrasonics*, 2000, 38: 824-826.
- [5] Nivesrangsan P, Steel J A, Reuben R L. Source location of acoustic emission in diesel engines [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21: 1103-1114.
- [6] Frank Schafer, Rolf Janovsky. Impact sensor network for detecting of hypervelocity impacts on spacecraft [J]. *Acta Astronautica*, 2007, 61(10): 901-911.
- [7] Choi K, Chang F K. Identification of impact force and location using distributed sensors [J]. *AIAA J*, 1996, 34(1): 136-142.
- [8] Shin E S. Real-time recovery of impact force based on finite element analysis [J]. *Comput Struct*, 2000, 76: 621-635.
- [9] Liu G R, Ma W B, Han X. An inverse procedure for identification of loads on composite laminates [J]. *Composites Part B*, 2002, 33: 425-432.
- [10] Hu N, Fukunaga H, Matsumoto S, et al. An efficient approach for identifying impact force using embedded piezoelectric sensors [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34: 1258-1271.
- [11] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [C] // *Proc of RADC Spectrum Estimation Workshop*. Griffiss AFB; [s. n.], 1979: 243-258.
- [12] Chui C K. *An introduction to wavelets* [M]. Boston: Academic Press, 1992.
- [13] Peng Ge, Yuan Shenfang. Damage localization on two-dimensional structure based on wavelet transform and active lamb wave - based method [J]. *Materials Science Forum*, 2006, 75(479): 2119-2122.
- [14] Swindlehurst A, Kailath T. A performance analysis of subspace-based methods in the presence of model errors: MUSIC algorithm [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1992, 40(7): 1758-1774.
- [15] Igor Aleksandrovich Viktorov. *Rayleigh and Lamb waves* [M]. New York: Plenum Press, 1967: 67-117.
- [16] 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波[J]. *无损检测*, 1999, 21(9): 409-413.
Liu Zhengqing. *Ultrasonic lamb waves nondestructive testing* [J]. *NDT*, 1999, 21(9): 409-413.
- [17] Kuznetsov S V. Subsonic lamb waves in anisotropic layers [J]. *J Appl Maths Mechs*, 2001, 65(2): 291-299.
- [18] Surgeon M, Wevers M. One sensor linear location of acoustic emission events using plate wave theories [J]. *Materials Science and Engineering*, 1999, A265: 254-261.
- [19] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 模态声发射基本理论[J]. *无损检测*, 2002, 24(7): 302-306.
Geng Rongsheng, Shen Gongtian, Liu Shifeng. A study on modal acoustic emission theory [J]. *NDT*, 2002, 24(7): 302-306.